DOI:

**Мерлан Тельманов**

[m.telmanov@ifce.kz](mailto:m.telmanov@ifce.kz), orcid.org/0009-0007-9193-8414

Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан

**Хусаин Болатбек**

[b.khusain@ifce.kz](mailto:b.khusain@ifce.kz)

Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан

**Хусаин Атабек**

[atabek.khussain@gmail.com](mailto:atabek.khussain@gmail.com)

Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан

**Бродский Александр**

[albrod@list.ru](mailto:albrod@list.ru)

Институт топлива, катализа и электрохимии имени Д.В. Сокольского, Алматы, Казахстан

**Моделирование и визуализация систем очистки выбросов: Роль цифровых двойников**

**Аннотация:** В статье рассматривается использование цифровых двойников для систем очистки выбросов тепловых электростанций (ТЭЦ) с целью повышения эффективности очистки и минимизации экологического ущерба. Приведен процесс создания цифрового двойника на платформе Unity, включая разработку 3D-моделей оборудования, симуляцию физико-химических процессов и интеграцию данных в реальном времени. Цифровой двойник позволяет оптимизировать параметры работы очистных систем, анализировать данные и обучать операторов. Такой подход способствует снижению выбросов загрязняющих веществ и улучшению экологической ситуации в регионах. Рассмотрены перспективы дальнейших исследований, включая внедрение ИИ, VR/AR и IoT.

**Ключевые слова:** Цифровой двойник, unity, система очистки выбросов, тепловая

электростанция (ТЭЦ), визуализация данных, симуляция промышленных процессов, снижение выбросов загрязняющих веществ.

**Abstract:** The paper discusses the use of digital twins for emission treatment systems of thermal power plants (TPPs) in order to improve treatment efficiency and minimise environmental damage. The process of creating a digital twin on the Unity platform is presented, including the development of 3D models of equipment, simulation of physical and chemical processes and real-time data integration. The digital twin enables optimisation of treatment system parameters, data analysis and operator training. This approach helps to reduce pollutant emissions and improve the environmental situation in the regions. Prospects for further research, including the introduction of AI, VR/AR and IoT, are discussed.

**Keywords:** Digital twin, unity, emission control system, thermal power plant (TPP), data visualization, simulation of industrial processes, reduction of pollutant emissions.

**Аннотация:** Мақалада тазарту тиімділігін арттыру және қоршаған ортаға келетін зиянды азайту мақсатында жылу электр станциясының (ЖЭО) шығарындыларын тазарту жүйелері үшін цифрлық егіздерді пайдалану талқыланады. Unity платформасында цифрлық егізді құру процесі, оның ішінде 3D жабдық үлгілерін әзірлеу, физикалық және химиялық процестерді модельдеу және нақты уақыттағы деректерді біріктіру ұсынылған. Цифрлық егіз тазарту жүйелерінің жұмыс параметрлерін оңтайландыруға, деректерді талдауға және операторларды оқытуға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл ластаушы заттардың шығарындыларын азайтуға және аймақтардағы экологиялық жағдайды жақсартуға көмектеседі. AI, VR/AR және IoT енгізуді қоса алғанда, одан әрі зерттеу перспективалары қарастырылады.

**Түйін сөздер**: Цифрлық егіз, unity, эмиссияны тазарту жүйесі, термиялық электр станциясы (ЖЭО), деректерді визуализациялау, өндірістік процестерді модельдеу, ластаушы заттардың шығарындыларын азайту.

**Введение**  
 Развитие современных информационных технологий в производстве связано с активным внедрением теории и практики цифровых двойников[1]. Традиционные подходы к проектированию, такие как имитационные и корреляционные модели, постепенно уступают место более технологичным методам описания реального мира в цифровой среде. Например, цифровой двойник максимально точно отражает сложность объекта, прогнозируя его свойства, функции и поведение, а также реакцию на различные внешние воздействия и взаимодействие с другими цифровыми двойниками, отображая поведение объектов в реальной среде [2].

За последние пять лет интерес к цифровым двойникам значительно возрос, что подтверждается увеличением числа научных публикаций, описывающих концепции и методы применения цифровых двойников, таких как компьютерное интегрированное производство (Computer-Integrated Manufacturing, CIM) [3], информационное моделирование зданий (Building Information Modeling, BIM) [4], мониторинг состояния оборудования и механизмов [5], а также виртуальные производственные системы [6]. Концепция CIM рассматривается как предшественник теорий и практического использования цифровых двойников. СИМ-модели способны точно моделировать объекты реального мира, обеспечивая высокую точность их описания и эффективное представление процессов, в которых эти объекты участвуют.

Как отмечается в исследовании [1], ключевой особенностью цифровых двойников является тесное взаимодействие между физическими объектами и их цифровыми аналогами. Электромеханические системы могут быть преобразованы в цифровые что значительно упрощает моделирование и управление процессами не только в производстве, но и в других сферах. Как писал Коровин Г.Б. в своей статье [9], "Технологии цифрового двойника в качестве ключевого элемента киберфизических систем способны обеспечивать мониторинг и управление физическими производственными процессами, используя виртуальную модель, принимать решения на основе анализа большого объема данных, получаемых от объекта."

**Актуальность проблемы**

Алматинские ТЭЦ играют ключевую роль в обеспечении теплом и электроэнергией потребителей Казахстана и Алматинской области, однако их работа сопровождается значительными выбросами в атмосферу. ТЭЦ, работающие на угле, генерируют дополнительную электроэнергию в режиме конденсации, что приводит к выбросам загрязняющих веществ. В 2006 году объем неочищенных выбросов составлял 4,85 тыс. тонн, а к 2018 году эта цифра увеличилась до 10,4 тыс. тонн. При этом ТЭЦ-2 в 2016 году выбросила 11% всех загрязнителей воздуха в регионе [7].

Проблема загрязнения воздуха особенно актуальна в связи с воздействием на здоровье населения и окружающую среду. На предприятиях, использующих различные виды сырья, формируется широкий спектр загрязнителей, включая эфиры уксусной кислоты, формальдегид, нафталин и многие другие вещества. Эти выбросы значительно ухудшают качество воздуха, что создает необходимость в поиске и внедрении технологий для их сокращения.

Отталкиваясь от данной статьи [8], эту проблему можно решить через декарбонизацию, используя мультимодульные системы, которые включают модули предварительной очистки дымовых газов, а также системы для улавливания, сбора и утилизации выбросов от тепловых устройств, работающих на ископаемом топливе. Модули предварительной очистки являются необходимыми, поскольку дымовые газы содержат не только диоксид углерода, но и множество других вредных веществ, включая пылевые частицы различной дисперсии. После предварительной очистки полученный чистый диоксид углерода можно использовать в тепличных хозяйствах, производстве соды, в пищевой промышленности, а также для производства метанола, удобрений и других продуктов.

Использование данного устройства позволяет существенно сократить объем выбросов, улучшая качество воздуха в регионе и снижая негативное воздействие на здоровье населения. Благодаря интеграции в технологический процесс ТЭЦ, очистка выбросов происходит эффективно и с минимальными затратами на эксплуатацию.

**Цифровой двойник зачем он нужен?**

Главная цель цифрового двойника - улучшение понимания работы реальных объектов и оптимизация их работы за счет моделирования различных сценариев и условий эксплуатации. С помощью цифрового двойника можно заранее предсказать возможные сбои, оптимизировать процессы, а также улучшить эффективность управления оборудованием и ресурсами.

Например, в контексте очистки выбросов на промышленных объектах цифровой двойник позволяет воспроизвести весь процесс фильтрации в виртуальной среде, оценить эффективность различных технологий очистки и протестировать их в условиях, максимально приближенных к реальности. Это особенно актуально для таких сложных объектов, как тепловые электростанции (ТЭЦ), где множество факторов влияют на выбросы и их состав.

Таким образом, внедрение цифрового двойника позволяет не только повысить эффективность управления процессами, но и снизить эксплуатационные затраты, улучшить экологическую обстановку и обеспечить безопасность работы оборудования.

**Применение Unity для создания цифрового двойника**

Unity — это универсальная платформа для разработки 3D-симуляций и игр, которая нашла широкое применение не только в индустрии развлечений, но и в промышленности. Одним из наших ключевых направлений использования Unity стало создание цифровых двойников - интерактивных виртуальных моделей реальных объектов и систем. Это позволяет нам визуализировать данные в реальном времени и эффективно управлять процессами, что значительно облегчает мониторинг и оптимизацию работы оборудования.

Мы активно используем Unity для создания реалистичных 3D моделей и симуляции систем очистки выбросов в реальном времени. Это позволяет объединить визуальные эффекты, детализированные симуляции и интерфейсы мониторинга в единой среде, что обеспечивает высокий уровень интерактивности и удобства использования.

Процесс разработки цифрового двойника состоит из нескольких ключевых этапов:

Наш подход к разработке цифрового двойника на платформе Unity состоит из нескольких ключевых этапов:

1. **Разработка 3D-модели объекта**

На первом этапе выбираются целевые объекты для цифровой модели системы очистки выбросов, такие как электрофильтры, катализаторы, эмульгаторы и блоки для сбора углекислого газа (CO₂). Затем, с использованием программы Blender, создаются трехмерные модели, учитывающие реальные размеры, пропорции и функциональные особенности объектов. После моделирования модели экспортируются в формате, совместимом с Unity (например, FBX), и импортируются в игровую среду, где проводится их оптимизация для повышения производительности симуляции, включая снижение количества полигонов, настройку уровней детализации (LOD) и использование текстур с оптимальным разрешением.

Моделям накладываются материалы, отражающие их физические свойства, такие как металлическость, шероховатость и прозрачность, а также применяются карты нормалей и отражений для создания реалистичного взаимодействия света с поверхностями. Далее добавляются анимации, показывающие работу объектов, например, движение фильтров, работу катализаторов и процессы сборки CO₂.

Интеграция моделей с математическими моделями физико-химических процессов позволяет синхронизировать визуальные элементы с данными в реальном времени и точно моделировать работу оборудования. Завершающим этапом является тестирование и отладка, чтобы обеспечить точность модели и соответствие реальным объектам.

Проект основывается на модульной архитектуре, охватывающей весь цикл обработки выбросов — от фильтрации до сбора CO₂. Каждый этап имеет отдельные модели и анимации, что упрощает тестирование, анализ и обучение операторов. Этот подход позволяет эффективно управлять процессами и создавать реалистичные цифровые двойники для обучения и оптимизации работы систем очистки.

**Электрофильтр**

* **Описание:** Визуализирован как цилиндрический блок с внутренними пластинами, которые имитируют процесс осаждения частиц за счет электрического заряда.
* **Результаты моделирования:**
  + Анимация притягивания частиц к пластинам при включении электрофильтра.
  + Графическое отображение накопления частиц и их удаления.
  + Возможность регулировать параметры, такие как напряжение и скорость потока, с изменением эффективности фильтрации в реальном времени.

**Катализатор**

* **Описание:** Прямоугольный блок с пористыми внутренними структурами, через которые проходят газы.
* **Результаты моделирования:**
  + Анимация движения молекул через пористую структуру катализатора.
  + Реализация химических реакций с изменением состава газа (например, превращение NOx в безвредные N₂ и O₂).
  + Визуализация снижения концентрации вредных веществ на выходе.

**Эмульгатор**

* **Описание:** Устройство с вращающимся элементом для перемешивания газа с жидкостью.
* **Результаты моделирования:**
  + Анимация смешивания газов с жидкой средой.
  + Симуляция изменения цвета эмульсии в зависимости от насыщенности газом.
  + Визуализация процессов связывания вредных веществ, таких как SO₂.

**Блок сбора CO₂**

* **Описание:** Система, включающая абсорбер и резервуар для сбора CO₂.
* **Результаты моделирования:**
  + Анимация потока газа через абсорбер, где CO₂ связывается специальным раствором.
  + Визуализация накопления CO₂ в резервуаре.
  + Возможность анализа данных в реальном времени, включая количество собранного CO₂ и эффективность процесса.

**Общий процесс**

* **Описание:** Вся система смоделирована как единый технологический поток.
* **Результаты моделирования:**
  + Визуализация последовательного прохождения выбросов через все этапы очистки.
  + Возможность изменять параметры (например, скорость потока или температуру) и наблюдать за их влиянием на эффективность.
  + Анимация работы всей системы с реалистичной физикой и динамикой.

**Визуальные и функциональные результаты:**

* **Графика:** Детализированные 3D-модели с текстурами и реалистичным освещением.
* **Интерактивность:** Возможность взаимодействия с каждым объектом (например, настройка параметров или включение/выключение).
* **Данные:** Отображение данных в реальном времени, таких как эффективность фильтрации, объем собранного CO₂ и химический состав выбросов на каждом этапе.
* **Обучение и анализ:** Использование цифрового двойника для обучения операторов и тестирования различных сценариев работы системы.

Этот процесс моделирования позволяет достичь высокой точности и наглядности, делая цифровой двойник полезным инструментом как для обучения, так и для оптимизации работы системы.

1. **Матиматические модели**

В данном разделе описываются расчеты, используемые для моделирования процессов очистки и улавливания углекислого газа (CO₂) в системе. Формулы позволяют точно описывать физические и химические процессы, происходящие в установках, и создавать реалистичную симуляцию в Unity. Для этого применяются продвинутые математические и физические методы, включая массовый и энергетический баланс, а также уравнения Навье-Стокса, что обеспечивает высокую точность воспроизведения реальных процессов и превосходит традиционные модели. Основные типы формул, которые мы используем, включают:

1. Массовый баланс

Массовый баланс используется для описания движения вещества через систему и помогает определить количество загрязняющих веществ на каждом этапе. Для расчетов массового баланса можно использовать следующую формулу:

(1)

Где:

— масса загрязняющих веществ, входящих в систему, выходящих из нее и накапливающихся на различных этапах.

Этот баланс помогает установить равновесие системы и оценить эффективность фильтров.

1. Энергетический баланс

Энергетический баланс позволяет учитывать количество энергии, необходимой для работы системы и поддержания процессов фильтрации и улавливания газа. Основное уравнение энергетического баланса:

(2)

Где:

* — количество тепла,
* — работа,
* — изменение внутренней энергии системы.

Этот баланс помогает оценить тепловые потери и эффективность процессов нагрева и охлаждения на различных этапах установки.

1. **Закон Кулона для точечного заряда**

Закон Кулона описывает силу, с которой взаимодействуют два точечных заряда. Если поле создается точечным зарядом , напряженность электрического поля в любой точке на расстоянии от этого заряда определяется следующим уравнением:

(3)

Где:

* — напряженность электрического поля (В/м),
* — величина точечного заряда (Кл),
* — расстояние от заряда до точки, в которой измеряется поле (м),
* ​ — электрическая постоянная, приблизительно равная 8.85×Ф/м.

Эта формула позволяет рассчитать напряженность электрического поля в зависимости от расстояния и величины заряда, что важно для моделирования электрических характеристик системы, если в проекте присутствуют элементы, работающие на основе электростатических принципов.

1. Уравнение **Пуассона для описания электрического поля**

Для описания распределения электрического потенциала  в пространстве, создаваемого электродами, применяется уравнение Пуассона. В случае, если в пространстве присутствует объемный заряд с плотностью , уравнение Пуассона принимает вид:

(4)

Где:

* — лапласиан потенциала, описывающий кривизну потенциала в пространстве,
* — плотность заряда (Кл/м³),
* ​ ​ — электрическая постоянная (8.85×Ф/м.).

Это уравнение помогает описывать распределение электрического поля вокруг электродов, учитывая наличие зарядов в среде.

1. Скорость химических реакций (каталитическая очистка)

Для моделирования движения воздушного потока в пространстве, что может быть важно для расчета движения частиц или потоков вокруг электродов и в системе очистки, применяется уравнение Навье-Стокса. Оно записывается следующим образом:

(5)

Где:

* (кг/м³),

* (м/с),
* — производная скорости по времени,
* — градиент давления (Н/м²),
* — коэффициент динамической вязкости (Па·с),
* — лапласиан скорости, учитывающий вязкость потока,
* — внешние силы, приложенные к потоку, например, сила тяжести.

Уравнение Навье-Стокса является основой для моделирования аэродинамических и гидродинамических процессов, позволяя точно описывать движение воздушного потока вокруг электродов и в пределах системы.

1. **Скорость потока и число Рейнольдса**

Для описания параметров воздушного потока используются формулы для расчета средней скорости потока и числа Рейнольдса .

1. **Средняя скорость потока** :

(6)

Где:

* — объёмный расход (м³/ч),
* — диаметр трубы (м),
* ≈ 3.14159.

1. **Число Рейнольдса :**

(7)

Где:

* — средняя скорость потока (м/с),
* — характерный размер, обычно диаметр трубы (м),
* — плотность воздуха или газа (кг/м³),
* η — динамическая вязкость (Па·с).

Число Рейнольдса является важным параметром, определяющим режим потока: ламинарный или турбулентный. Значение указывает на ламинарный поток, тогда как - на турбулентный.  
  
**3.** Создание схем

На этапе создания цифрового двойника в Unity, разработка схем является важной частью, так как она позволяет нам структурировать и визуализировать весь процесс работы очистных систем. Схемы упрощают понимание сложных технологических процессов и помогают отобразить ключевые элементы системы. Мы разработали две основные схемы, каждая из которых выполняет свою роль в демонстрации работы системы:

**3.1** Основная схема очистного комплекса

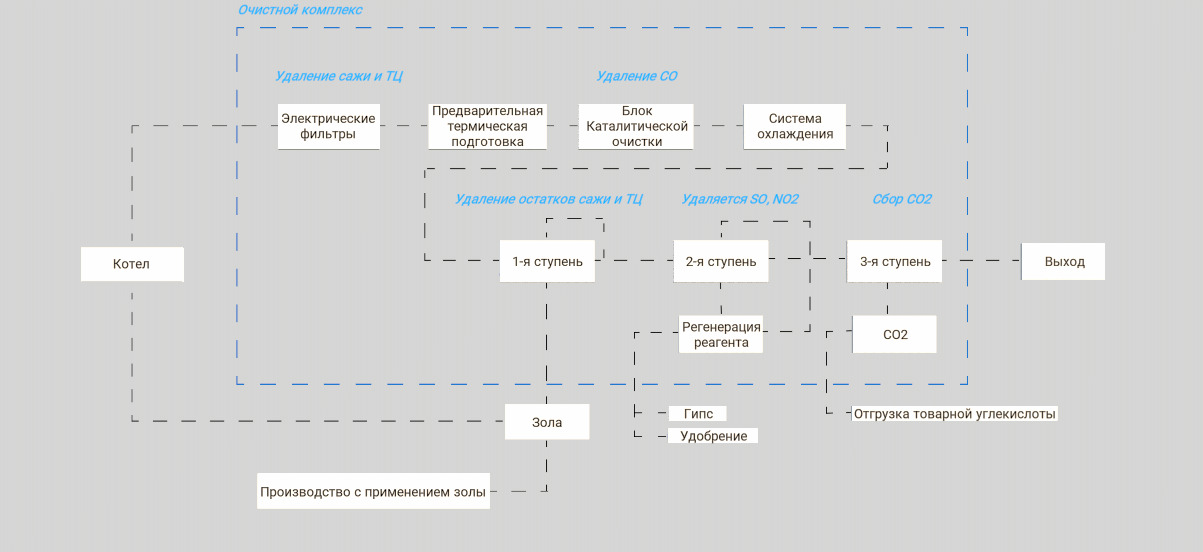


Рис. 1 Основная схема

Эта схема (рис.1) отражает общую структуру очистного комплекса, начиная от подачи газа из котла и заканчивая его выходом после очистки. На схеме мы выделили все ключевые элементы, участвующие в процессе очистки выбросов, такие как:

Электрические фильтры, которые удаляют сажу и твердые частицы из газов, выходящих из котла. Блоки предварительной термической подготовки, которые подготавливают газ к дальнейшему очищению, снижая его температуру и обеспечивая оптимальные условия для следующих этапов.

Блоки каталитической очистки, которые служат для удаления оксида углерода (CO) и других токсичных компонентов с использованием катализаторов.

Системы охлаждения, которые обеспечивают снижение температуры газа перед поступлением в дальнейшие стадии очистки.

Этапы удаления серы (SO) и диоксида азота (NO₂), которые выполняются в несколько ступеней, обеспечивая высокую степень очистки от загрязняющих веществ.

Сбор CO₂, который осуществляется на финальной стадии, где углекислый газ выделяется из газового потока для последующей обработки и использования в производственных процессах.

Мы создавали эту схему с учетом всех технологических процессов и потоков, чтобы максимально точно отразить работу реального объекта. Схема помогает нам и нашим партнерам визуализировать взаимодействие всех компонентов системы и понимать, как изменение условий на одном этапе влияет на весь процесс.

* 1. Схема процесса сбора углекислого газа (CO₂)

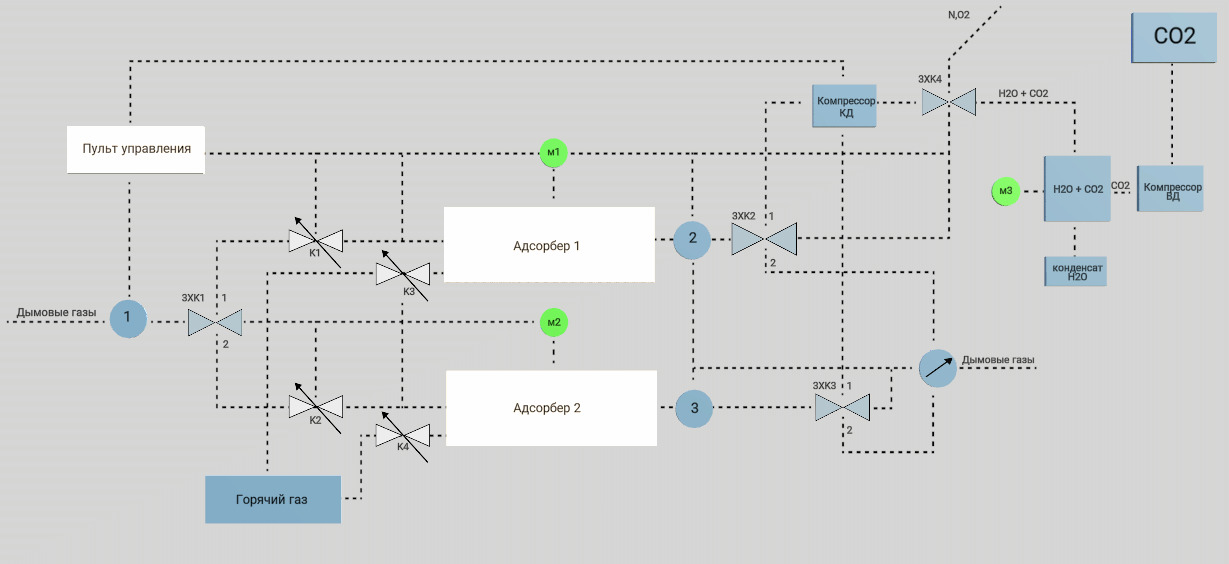


Рис 2. Схема сбора углекислого газа

Схема изображенная на (рис.2) детализирует процесс извлечения углекислого газа из потока дымовых газов. Эта схема помогает увидеть, как происходит сбор CO₂ на более тонком уровне и какие элементы оборудования участвуют в этом процессе. На схеме отражены:

Два адсорбера, которые последовательно очищают газовый поток, поглощая углекислый газ. Каждый адсорбер работает по принципу адсорбции: горячие дымовые газы пропускаются через специальный сорбент, который связывает CO₂.

Система управления клапанами, которые регулируют поток газа между адсорберами. Эти клапаны помогают направлять поток в зависимости от того, какой адсорбер в данный момент активен.

Компрессоры, которые сжимают очищенный газ, обеспечивая оптимальные условия для последующего отделения и транспортировки CO₂. Компрессоры работают в нескольких стадиях, чтобы постепенно повышать давление газа.

Блок конденсации, в котором происходит охлаждение сжатого газового потока и конденсация водяного пара, отделяя воду от CO₂. Это важный этап, позволяющий получить более чистый газовый поток.

Система отвода очищенного CO₂, который затем направляется на дальнейшую обработку или транспортировку в производственные процессы, например, для использования в сельском хозяйстве или химической промышленности.

Мы разработали эту схему, чтобы подробно показать, как происходит извлечение углекислого газа на каждой стадии, какие параметры регулируются в процессе (давление, температура) и как взаимодействуют между собой компоненты системы. Эта схема помогает более точно анализировать эффективность работы системы и вносить необходимые изменения в виртуальной модели, прежде чем внедрять их на реальном объекте.

1. **Интеграция с данными реального времени**

Одной из ключевых особенностей нашего подхода является синхронизация данных с физическими датчиками через REST и WebSocket протоколы. Это помогает поддерживать актуальность визуализаций и превращает цифровой двойник из простой симуляции в полноценный инструмент для мониторинга и управления процессами в реальном времени.

Этот процесс включает несколько в заимосвязанных шагов:

1. **Подключение датчиков**  
    На физическом оборудовании устанавливаются датчики, которые собирают данные о параметрах работы системы. Это могут быть показатели температуры, давления, концентрации загрязняющих веществ, скорости потоков и другие важные параметры. Например, в системе очистки выбросов датчики могут измерять концентрацию CO₂ на каждом этапе очистки, температуру газового потока и эффективность фильтрации.
2. **Передача данных в реальном времени**  
    Собранные датчиками данные передаются через сеть (локальную или облачную) в систему управления. Для интеграции с Unity эти данные могут быть переданы в формате JSON, XML или через API, разработанный специально для конкретной установки. Unity поддерживает взаимодействие с внешними источниками данных через такие протоколы, как REST или WebSocket, что позволяет обеспечить надежный обмен данными в режиме реального времени.
3. **Обработка данных в Unity**  
    Данные, поступающие от датчиков, обрабатываются внутри игрового движка. Для этого создаются скрипты на C#, которые принимают входящие значения и преобразуют их для работы с визуальными и симуляционными компонентами. Например, изменение температуры в реальном оборудовании может динамически менять цветовую гамму объекта в Unity (тепловую карту) или влиять на скорость движения потока частиц в анимации.
4. **Синхронизация параметров с виртуальными объектами**  
    Параметры, полученные в реальном времени, напрямую связываются с компонентами модели в Unity. Например:
   * Данные о концентрации CO₂ обновляют показатели в информационных панелях, отображаемых пользователю.
   * Изменения давления в системе анимируют работу клапанов или компрессоров.
   * Реальные измерения температуры визуализируются в виде градиента теплового излучения на трубах и фильтрах.
5. **Создание интерфейса для мониторинга**  
    Unity позволяет разрабатывать удобные интерфейсы для визуализации данных. На экране оператора отображаются актуальные показатели, которые обновляются в реальном времени. Для удобства мониторинга могут быть созданы интерактивные графики, схемы и предупреждения о выходе параметров за допустимые пределы.
6. **Реализация симуляции на основе данных**  
    Данные реального времени используются для запуска симуляций в виртуальной среде. Например, если датчики обнаруживают повышение концентрации CO₂, цифровой двойник может предсказать, как это повлияет на эффективность системы очистки и предложить оптимальные настройки оборудования. Такие симуляции позволяют анализировать возможные сценарии без риска для реального оборудования.
7. **Обратная связь с физической системой**  
    В некоторых случаях цифровой двойник может передавать данные обратно в реальное оборудование, автоматизируя корректировку его работы. Например, при обнаружении снижения эффективности фильтров система может автоматически предложить изменение потока газа или температуру, что будет применено в реальной установке.
8. **Обеспечение безопасности данных**  
    Для работы с данными реального времени важна защита информации. В системе интеграции используются методы шифрования, контроля доступа и резервного копирования, чтобы избежать несанкционированного доступа или потери данных.

Этот подход обеспечивает непрерывное обновление состояния виртуальной модели, что делает цифровой двойник не только инструментом визуализации, но и мощным средством анализа, оптимизации и управления процессами.

1. **Симуляция процессов и анализ данных**

Один из наиболее важных этапов работы с цифровыми двойниками, который позволяет виртуально моделировать различные сценарии работы системы, анализировать их и принимать оптимальные решения. Этот процесс включает несколько ключевых шагов:

1. **Создание сценариев симуляции**  
    На основе данных, поступающих от реальной системы или заданных вручную, разрабатываются сценарии, которые воспроизводят различные условия работы. Например, в системе очистки выбросов можно моделировать:
   * Изменения скорости потока газа.
   * Снижение эффективности электрофильтров из-за загрязнений.
   * Аварийные ситуации, такие как перегрев или утечка газа.
2. **Использование физических моделей**  
    Для симуляции процессов применяются математические и физические модели, описывающие реальные явления. Например:
   * **Массовый и энергетический балансы** — для расчета движения вещества и энергии через систему.
   * **Законы аэродинамики** — для моделирования потока газа, используя уравнения Навье-Стокса.
   * **Химические реакции** — для анализа эффективности каталитической очистки газов.  
     Эти расчеты реализуются в Unity с помощью скриптов на C#, которые динамически обновляют параметры симуляции.
3. **Визуализация процессов**  
    Симуляция становится наглядной благодаря визуальным эффектам. Unity позволяет отображать:
   * Потоки газа в виде частиц с анимацией, демонстрирующей их направление и скорость.
   * Изменение концентрации веществ, используя тепловые карты или градиенты цвета.
   * Движение компонентов системы, таких как клапаны, компрессоры или фильтры.

**Проведение анализа данных**  
 Для создания дашбордов в Google Sheets данные организуются в таблицах, где они группируются по категориям. Это могут быть временные ряды (например, связь показателей с временными метками) или агрегированные результаты, такие как средняя концентрация CO₂ за сутки. Для упрощения работы с данными создаются отдельные вкладки для различных типов информации, таких как "Эффективность фильтров", "Температура системы" или "Поток газа".

Используются формулы и сводные таблицы для вычисления ключевых показателей. Например, средняя эффективность системы рассчитывается с помощью формулы =AVERAGE(range), а изменения параметров — с использованием разности текущего и предыдущего значений. Сводные таблицы помогают структурировать и анализировать данные, группируя их по временным интервалам, дате или типу процесса.

Для визуализации информации в Google Sheets создаются диаграммы. Линейные графики используются для отслеживания изменений параметров с течением времени, столбчатые диаграммы — для сравнения эффективности на разных стадиях, а круговые — для анализа распределения энергозатрат. Эти графики настраиваются с учетом цветов, подписей и легенд, чтобы сделать данные более понятными.

На отдельной вкладке объединяются ключевые элементы, такие как графики и таблицы, в форме визуального дашборда. Для лучшего восприятия добавляются текстовые аннотации, отметки о превышении допустимых норм и указания на отклонения. Такой подход позволяет быстро анализировать данные и выявлять важные тенденции.

Для подготовки данных для симуляции в Unity собираются данные, поступающие от датчиков или моделируемые в движке, например, концентрация CO₂, скорость потоков и температура. Эти данные фиксируются в виде массивов или таблиц и могут быть сохранены локально либо отправлены в облачное хранилище для дальнейшего анализа.

Unity позволяет экспортировать данные в Google Sheets, используя API-интерфейсы или интеграцию с Google Sheets API for Unity. С помощью этой библиотеки данные, такие как показатели температуры, давления и эффективности фильтров, передаются в заданные диапазоны таблиц.

Пример отправки данных в Google Sheets через Unity:

using Google.Apis.Sheets.v4;

using Google.Apis.Sheets.v4.Data;

// Пример отправки данных в Google Sheets

private void SendDataToGoogleSheet(string spreadsheetId, string range, IList<IList<object>> data)

{

var request = new ValueRange { Values = data };

var updateRequest = sheetsService.Spreadsheets.Values.Update(request, spreadsheetId, range);

updateRequest.ValueInputOption = SpreadsheetsResource.ValuesResource.UpdateRequest.ValueInputOptionEnum.RAW;

var response = updateRequest.Execute();

}

Этот процесс позволяет эффективно синхронизировать данные из Unity с таблицами Google Sheets, что делает их доступными для анализа и визуализации.

**Тестирование альтернативных решений**  
 Симуляция позволяет виртуально протестировать различные настройки оборудования и технологии очистки. Например:

* Оценить, как использование нового типа катализатора повлияет на эффективность.
* Проверить, как изменение скорости потока газа повлияет на эффективность фильтрации и энергопотребление.
* Моделировать различные сценарии, такие как рост концентрации CO₂ или выход из строя одного из компонентов.

**Оптимизация процессов**  
 На основе анализа данных выявляются узкие места и оптимальные параметры работы системы. Например:

* Можно найти оптимальную температуру или давление для работы фильтров.
* Определить, какой режим работы компрессоров минимизирует энергопотребление при максимальной эффективности.

Этот этап позволяет получить глубокое понимание процессов, повысить их эффективность, минимизировать риски и обеспечить надежную работу системы. Использование Unity как платформы для симуляции делает процесс интерактивным, визуально понятным и легким для анализа

**Заключение**

В заключение можно отметить, что создание цифровых двойников для систем очистки и улавливания углекислого газа (CO₂) в Unity открывает широкие перспективы для повышения эффективности промышленных процессов и улучшения экологической ситуации. С помощью цифровых моделей, подкрепленных физическими и химическими расчетами, мы можем более точно симулировать сложные процессы, происходящие в установках для очистки газов, оценивать их производительность и определять возможности для оптимизации.

В статье мы подробно рассмотрели процесс построения схемы системы, создания и использования математических моделей, а также настройки взаимодействий и визуальных эффектов для наглядного отображения всех этапов очистки. Использование Unity для разработки таких моделей позволяет не только улучшить визуальное представление работы системы, но и создать удобные инструменты для мониторинга и анализа данных в реальном времени. Это, в свою очередь, помогает операторам и инженерам быстрее принимать обоснованные решения по улучшению системы, прогнозировать её поведение в различных сценариях и предотвращать потенциальные сбои.

Применение цифровых двойников в области экологического инжиниринга и промышленных технологий имеет значительный потенциал для дальнейшего развития. Они позволяют исследовать и тестировать новые подходы к улавливанию CO₂ и другим процессам очистки, что способствует сокращению выбросов и поддержанию экологического баланса. В условиях глобальных усилий по снижению воздействия на окружающую среду, такие технологии становятся неотъемлемой частью устойчивого развития промышленности и общества в целом.

**Перспективы дальнейших исследований**

В дальнейших исследованиях цифровых двойников для систем улавливания CO₂ включают улучшение точности моделирования с добавлением детализированных процессов и лабораторных данных, интеграцию ИИ и машинного обучения для адаптации к изменяющимся условиям и прогнозирования неисправностей, создание интерфейсов реального времени для удобного управления и мониторинга. Дополнительные исследования могут сосредоточиться на оценке энергозатрат и экономической эффективности, применении VR/AR для обучения и анализа, а также на интеграции с IoT для мониторинга состояния системы в реальном времени. Эти направления позволят повысить точность и полезность цифровых двойников для промышленного применения.

**Литература**

1. Radhakisan B., Gill H. Cyber-physical systems // The Impact of Control Technology. 2011. Р. 161–166.
2. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // IFAC-PapersOnLine. 2015. V. 48. N 3. Р. 567–572. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141
3. Laengle S., Modak N.M., Merigó J.M., De La Sotta C. Thirty years of the international journal of computer integrated manufacturing: a bibliometric analysis // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2018. V. 31. N 12. Р. 1247–1268. doi:10.1080/0951192X.2018.1529434
4. Abramovici M., Göbel J.C., Savarino P. Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2017. V. 66. N 1. Р. 165–168. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.042
5. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // Procedia CIRP. 2018. V. 82. Р. 243–248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139
6. Baruffaldi G., Accorsi R., Manzini R. Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies: a decision-support tool // Industrial Management & Data Systems. 2019. V. 119. N 2. Р. 251–273. doi: 10.1108/IMDS-01-2018-0033
7. Moldagazyeva J.Y., Zhakan A., Argynbai A., International Scientific Journal ‘symbol of science’// Environmental impact of thermal power plants/ P. 190 - 194.
8. B.Kh. Khussain, A.R. Brodskiy, A.S. Sass, I.I. Torlopov, K.R. Rakhmetova Preliminary treatment of thermal devices' emissions in decarbonization technology// Reports of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan// Volume 1. Number 349 (2024), 271–282// https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.272
9. G. Korovin, The opportunities for using digital twins in Industry// Vestnik zabGU// Volume 27. Number 8 (2021), 124-133// https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-8-124-133